

Um Rádio-Telescópio Decamétrico no Instituto de Física, UFRGS, para o Estudo do Sol
e Júpiter

Antonio de Moraes Mendonça Teles

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Física da
UFRGS em preenchimento parcial dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Física.

Orientador: Prof. Ricardo Eugenio Francke
Sandoval

Porto Alegre

2007

Um Rádio-Telescópio Decamétrico no Instituto de Física, UFRGS, para o Estudo do Sol e Júpiter

A. de Moraes

*Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento
Gonçalves, 9500, Cx. P. 15051, Porto Alegre, RS 91501-970, Brasil, Email:
ademorais1@hotmail.com*

INTRODUÇÃO

Desde 1931, com o descobrimento por **Jansky [1]** de emissões extra-terrestres de ondas eletromagnéticas de rádio (vindas da Via Lactea - galáxia onde habitamos; e com sinal mais forte vindo da direção do centro dela), passando pelo descobrimento em 1942 por **Hey [2]** de rádio-emissões vindas de nossa estrela, o Sol, e pelo descobrimento em 1955 por **Burke e Franklin [3]** de rádio-emissões vindas do planeta gigante gasoso Júpiter, do Sistema Solar, que a rádio-astronomia solar-planetária vem desenvolvendo-se bem com foco e aplicações científico-tecnológicas no clima e comunicações no planeta Terra (por causa da interação tempestades solares - Terra, podendo estas ser medidas pela rádio-astronomia do Sol); e também com foco e aplicações científico-tecnológicas no estudo dos planetas gigantes, como Júpiter - "Jovianos", e diretrizes de missões robóticas atuais e futuras a estes planetas (por causa das estruturas magnetofluidodinâmicas em suas magnetosferas, podendo estas ser estudadas pela rádio-astronomia de Júpiter), e também como modelos astrofísicos de planetas gigantes gasosos extra-solares.

Radio JOVE é uma rede de rádio-telescópios que são projetados para estudantes e quaisquer pessoas interessadas em rádio-astronomia para estudar o Sol e Júpiter. No *site* da Radio JOVE na Internet você pode percorrer arquivos de dados, *logar* em outros rádio-telescópios usando *software* livre (também interagindo com rádio-observatórios profissionais em tempo-real pela Internet), fazer observações científicas, e comprar à baixo custo material para montar seu próprio rádio-telescópio. Pode-se sintonizar o rádio-telescópio JOVE e escutar-se o Sol ou Júpiter de uma forma similar a que se escuta um rádio comum. O projeto Radio JOVE é mantido pela NASA - Gordon Space Flight Center, entre outras Instituições. Estas observações rádio-astronômicas pelo Radio JOVE são compartilhadas gratuitamente por uma equipe formada por cientistas, engenheiros, técnicos, professores, estudantes ao redor do mundo.

OBJETIVO

O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Física - é apresentar à Banca Examinadora aprovada pela Comissão de Graduação do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), minha proposta original de projeto de construção e operação de um pequeno, simples e economicamente viável, rádio-telescópio decamétrico (que funciona na faixa de comprimentos de ondas em torno de $\lambda = 1,49 \times 10^1$ m) (frequência $\nu = 20,1$ MHz (megahertz)), no Instituto de Física (IF) da UFRGS, para estudar as rádio-emissões do Sol e do planeta Júpiter, utilizando informações da NASA. Este aluno, utilizando conhecimento adquirido em **eletrodinâmica clássica [4]**, foi orientado pelo Professor Dr. Ricardo E. Francke Sandoval, IF-UFRGS. Este projeto de pesquisa no Brasil pode contribuir à rádio-astronomia solar e planetária.

METODOLOGIA

Em conjunto com o Professor orientador, pretendo utilizar informações científico-tecnológicas da NASA, através de seu projeto público "Radio JOVE - Solar & Planetary Radio Astronomy for Schools" [5] que está disponibilizado na Internet, para propor a seguinte metodologia para futura construção e operação do rádio-telescópio Radio JOVE no IF-UFRGS, e em outros centros no Brasil. Além deste aluno, existe no Brasil (em outros estados) outras nove pessoas interessadas no projeto Radio JOVE [5].

- Em **primeiro lugar** obtivemos conhecimento teórico da rádio-astronomia do Sol e de Júpiter.

Teoria Física de Antena

Antena é um transdutor (aparelho elétrico que converte um tipo de energia em outro para vários propósitos) projetado para receber ou transmitir ondas eletromagnéticas de rádio. Antenas convertem ondas eletromagnéticas nas frequências de rádio em correntes elétricas de rádio-frequência, e vice-versa.

A antena dipolo, que é utilizada no rádio-telescópio JOVE (para receber ondas eletromagnéticas de rádio) é simplesmente dois fios metálicos apontados em sentidos opostos arranjados ou horizontalmente ou verticalmente, com um final de cada fio conectado ao rádio-receptor e o outro final livre. A antena dipolo é a antena prática mais simples. O ganho da antena dipolo é um parâmetro que mede a direcionalidade da antena. Uma antena de alto-ganho recebe radiação de direções particulares, e uma antena com baixo ganho recebe radiação de todas direções igualmente. A razão entre a intensidade da primeira e da segunda é o ganho. Geralmente, o dipolo é considerado omnidirecional no plano perpendicular ao eixo da antena, mas ela tem pontos vazios na direção do eixo. Variações da antena dipolo inclui a antena meia-onda. Abaixo, na Figura 1, está um desenho mostrando o padrão tri-dimensional das linhas de força do campo eletromagnético de rádio em uma antena de dipolo meia-onda, que é utilizada no rádio-telescópio JOVE. O eixo da antena está no eixo da figura.

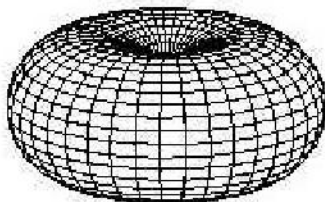


Figura 1: Desenho mostrando o padrão tri-dimensional de radiação eletromagnética de rádio em uma antena de dipolo meia-onda, utilizada no rádio-telescópio JOVE.

Teoria de Operação do Sistema Antena - Receptor

Sinais de rádio do Sol e de Júpiter são fracos (quando comparados às emissões artificiais) - eles produzem menos de 1 milionésimo de volt (1 microvolt, $1 \mu\text{v}$) nos terminais da antena no receptor. Esses fracos sinais de rádio-frequências (RF) devem ser amplificados pelo receptor e convertidos a sinais de áudio com força suficiente para fazer funcionar fones de ouvido ou caixas de som. O receptor também serve como um filtro eletrônico estreito, sintonizado em uma frequência específica para escutar-se o Sol ou Júpiter enquanto no mesmo instante bloquear estações de rádio na Terra em outras frequências. O receptor e sua antena são projetados para operar sobre uma faixa estreita de frequências de ondas curtas centradas em torno de 20,1 MHz. Essa faixa de frequências é ótima para escutar-se sinais de rádio do Sol e de Júpiter. Abaixo, na Figura 2, está um diagrama em bloco mostrando o funcionamento do receptor.

Antena

A antena intercepta ondas eletromagnéticas fracas que viajam $1,489 \times 10^8$ Km do Sol e $6,287 \times 10^8$ Km de Júpiter (distância média) a Terra. Quando essas ondas eletromagnéticas atingem o fio da antena, uma voltagem RF é desenvolvida nos terminais da antena. Sinais da antena são então transmitidas aos terminais da antena no receptor através de uma linha de transmissão coaxial.

Filtro RF de Banda-Passante e Pré-Amplificador

Sinais da antena são filtrados eletronicamente para rejeitar-se forte interferência fora-de-banda e são então amplificados usando-se um transistor de junção de efeito de campo (JFET). Esse transistor e seu circuito associado fazem uma filtragem adicional e amplificam os sinais vindos externamente por um fator de 10. O circuito de chegada no receptor é projetado para, eficientemente, transferir potência da antena ao receptor enquanto desenvolve-se um mínimo de ruído dentro do próprio receptor.

Oscilador Local e *Mixer*

O oscilador local (LO) e o *mixer* fazem o importante serviço de converter os sinais RF desejados para a faixa de frequências de áudio. O LO gera uma onda de voltagem com frequência na vizinhança de 20,1 MHz. A frequência exata é colocada pelo controle de sintonia no painel frontal do receiver. Ambos o sinal RF amplificado da antena e a frequência LO são passados ao *mixer*. O *mixer* desenvolve um novo sinal que é a diferença aritmética entre o LO e a frequência de sinal vindo da antena. Por exemplo, suponha que o sinal desejado está em 20,101 MHz e que o LO está sintonizado para 20,100 MHz. A frequência diferenciada é portanto $20,101 - 20,100 = 0,001$ MHz, que é uma frequência de áudio de 1 KHz (kilohertz). Se um sinal desejado estivesse em 20,090 MHz ele seria convertido a uma frequência de áudio de 10 KHz. Como o sinal RF é convertido diretamente para áudio, este rádio é conhecido como um receptor de conversão direta.

Filtro de Banda-Passante Baixa

Para eliminar-se estações de rádio interferentes a frequências próximas, utiliza-se um filtro eletrônico que é como uma janela com poucos kilohertz de largura através do qual os sinais do Sol e de Júpiter podem entrar. Quando procurando-se escutar o Sol ou Júpiter, o rádio será sintonizado para achar um "canal claro". Como frequências com mais de poucos quilohertz longe da frequência central (20,1 MHz) podem conter sinais interferentes, essas frequências mais altas devem ser eliminadas. Esse é o objetivo do filtro de banda-passante baixa (após o *mixer*). Passa baixas frequências de áudio até em torno de 3,5 KHz e atenua frequências maiores.

Amplificadores de áudio

O objetivo desses amplificadores de áudio após o filtro de banda-passante baixa é pegar o sinal de áudio muito fraco vindo do *mixer* e amplificá-lo o bastante para fazer funcionar diretamente fones de ouvido, ou um equipamento de caixas de som amplificadas externas.

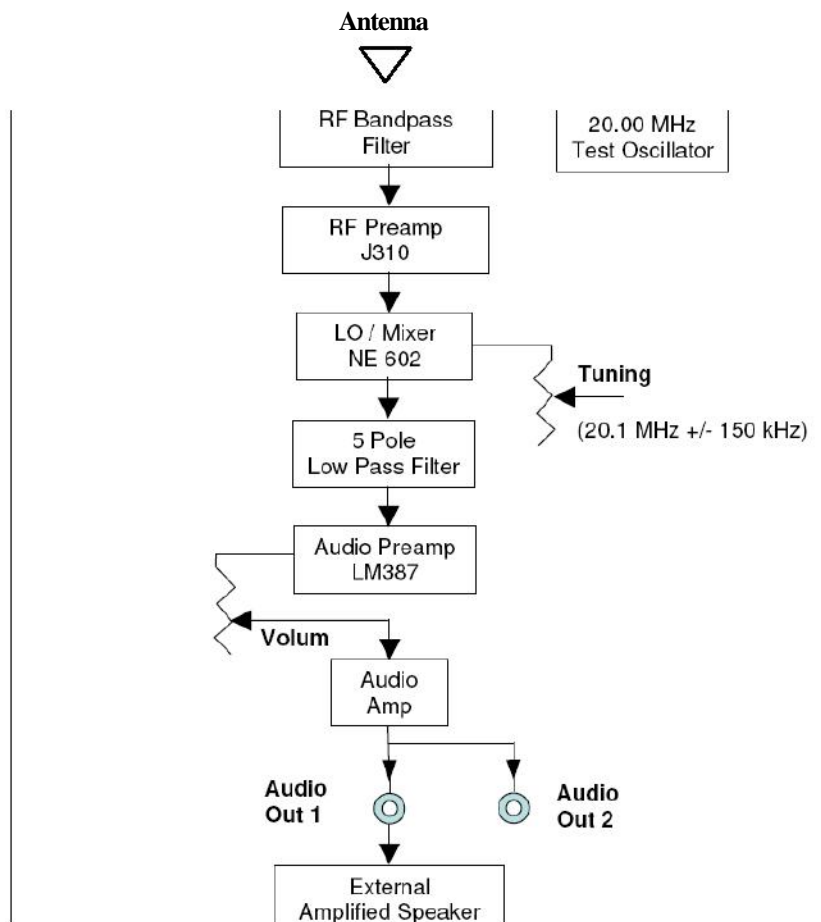


Figura 2: Desenho esquemático em bloco mostrando o funcionamento do receptor-amplificador rádio JOVE.

- Em **segundo lugar** propomos a construção do receptor-amplificador e da antena (cujos manuais encontram-se gratuitamente para *download* naquele *site* da NASA, e cujas peças simples de material de construção, elétrico e eletrônico podem ser adquiridas fácil e economicamente em lojas destes tipos no Brasil). É imprescindível a leitura detalhada, passo-à-passo, das informações contidas naquele *site* e nos manuais para a correta construção e operação do rádio-telescópio JOVE. Outras peças eletrônicas fundamentais para a construção do rádio JOVE vêm apenas dos Estados Unidos, assim sendo, existe apenas essa dificuldade de construção deste equipamento no Brasil. Por exemplo, uma bobina indutiva precisa ter seu filamento enrolado manualmente de forma específica para o amplificador do rádio-telescópio JOVE. Abaixo, na Figura 3, está o desenho esquemático do circuito eletrônico deste amplificador. Na Figura 4, está o desenho com vista de "raios-X" da placa de circuito impresso (vista pelo lado dos componentes eletrônicos) deste receptor-amplificador. Na Figura 5, está uma fotografia do receptor mostrando a parte superior. Na Figura 6, está uma fotografia do receptor mostrando a parte frontal.

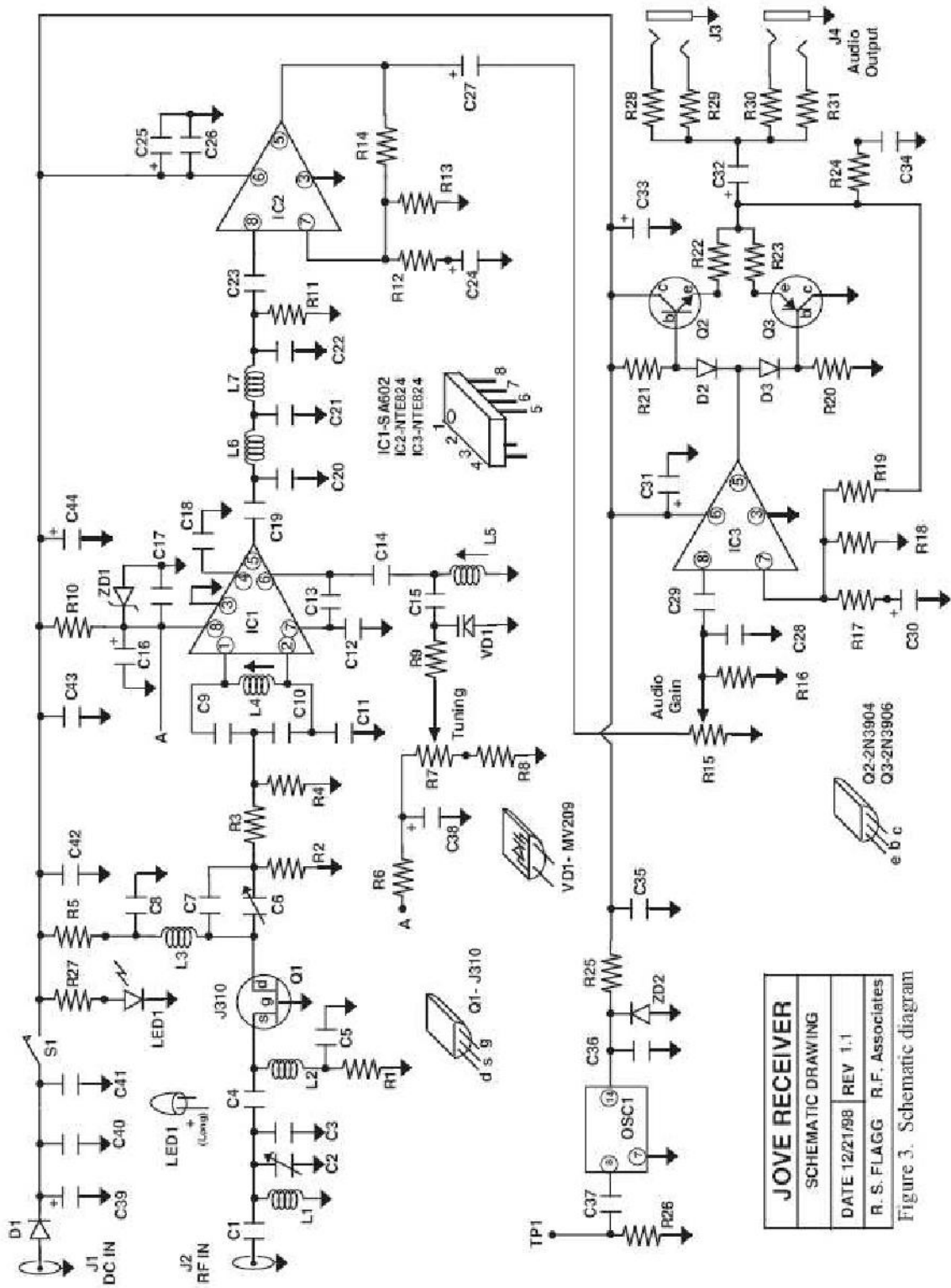


Figura 3: Desenho esquemático do circuito eletrônico do receptor-amplificador rádio JOVE.

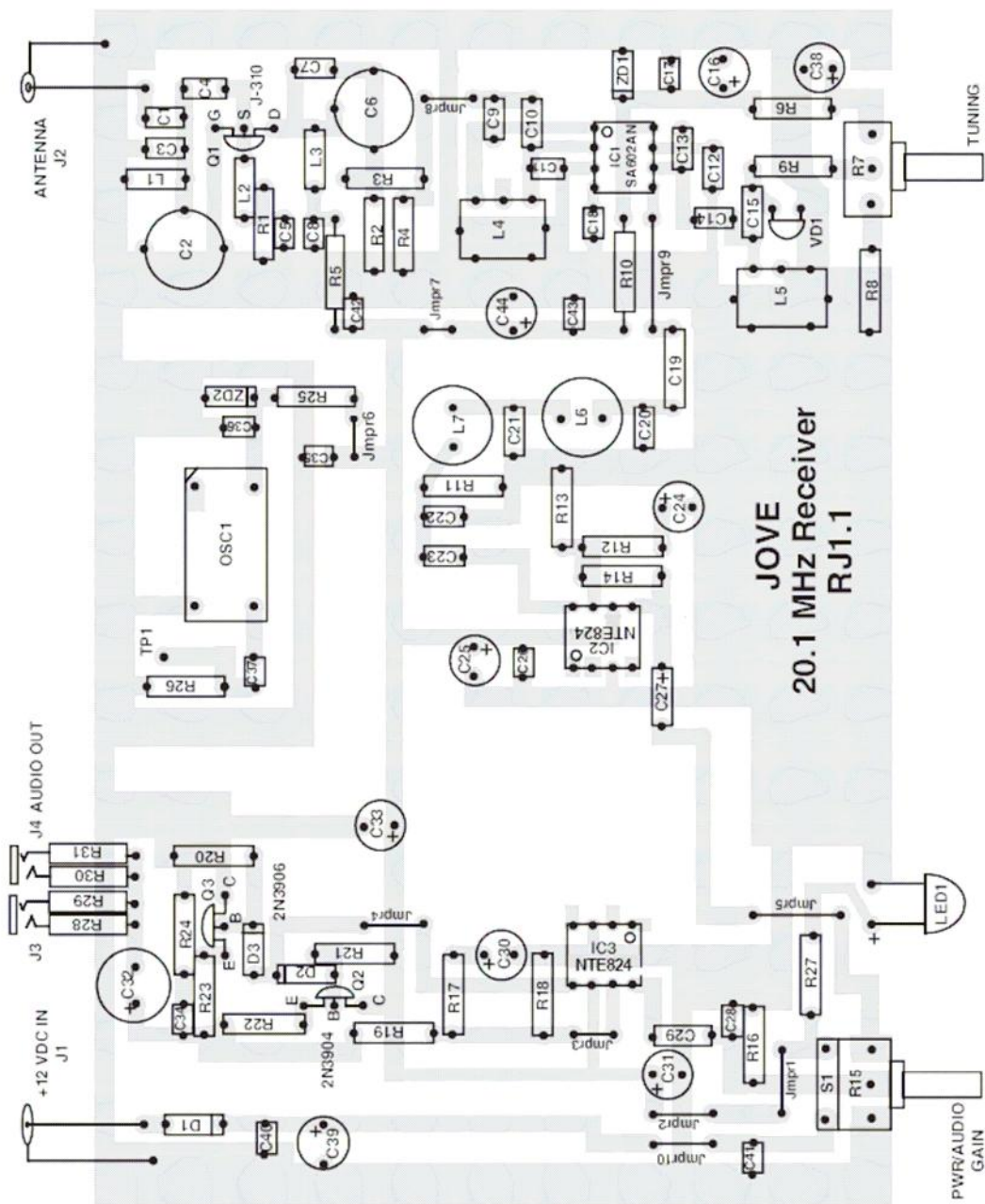


Figure 4. X-ray view of PC board from component side

Figura 4: Desenho com vista de "raios-X" da placa de circuito impresso (vista pelo lado dos componentes eletrônicos) do receptor-amplificador rádio JOVE.

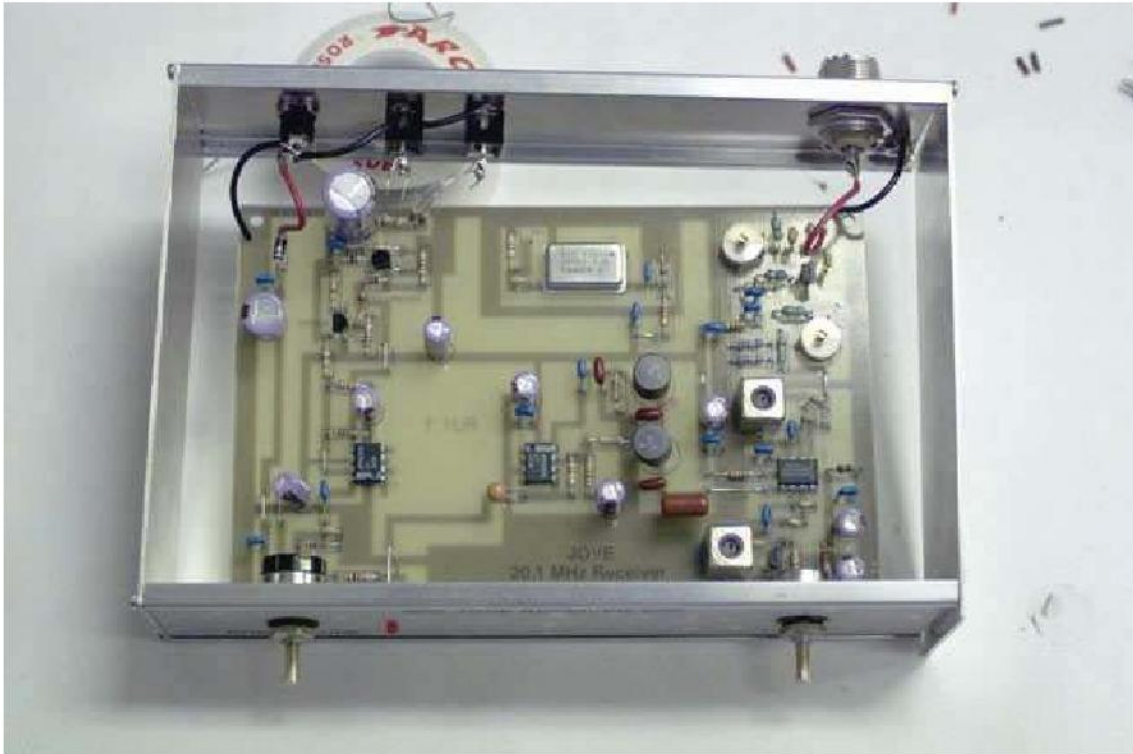


Figura 5: Fotografia do receptor JOVE mostrando a parte superior.



Figura 6: Fotografia do receptor JOVE mostrando a parte frontal.

- Em **terceiro lugar** propomos a montagem da antena em um lugar de fácil acesso dentro do IF-UFRGS (sem a necessidade de construção ou reforma de qualquer estrutura civil). Pode-se montá-la em cima de um prédio do IF-UFRGS, ou no meio de algum local cercado de elevações naturais dentro do *campus* da Universidade (para evitar interferência por sinais eletromagnéticos artificiais - ruído externo). Abaixo, na Figura 7, está uma fotografia do início da montagem de uma antena nos Estados Unidos. Na Figura 8, está uma fotografia da antena quase pronta. Na Figura 9, está uma fotografia da antena já montada. Note que a antena dipolo propriamente dita são os fios finos que estão suspensos horizontalmente a uma certa altura do solo. As demais estruturas são de apoio e fixação. Na Figura 10, está um desenho mostrando a localização de estacas, mastros e um fio dipolo da antena. O tamanho mínimo requerido para erguer-se a antena dipolo é 3,05 m por 9,75 m. O dipolo deve estar a uma distância mínima de 3,05 m a 4,57 m de qualquer objeto metálico com mais de 0,10 m de tamanho. É necessário muita cautela ao erguer-se o dipolo. Fique bem longe de linhas de transmissão elétricas, pois pode haver perigo de eletrocussão. Na Figura 11, está um desenho esquemático da antena dipolo mostrando uma vista superior para montagem, com dimensões e orientação geográfica. A antena dipolo tem 7,09 m de comprimento e a estrutura toda tem 9,75 m de comprimento. A antena é orientada na direção Leste-Oeste. Isto se deve a que o Sol e Júpiter se movem na esfera celeste de Leste para Oeste, e assim as ondas eletromagnéticas de rádio destes objetos celestes são melhores captadas naquela direção, e com o decorrer das estações do ano há sempre uma boa captação.



Figura 7: Fotografia do início da montagem de uma antena nos Estados Unidos - fixando o primeiro mastro, colocando os dipolos um de cada vez.



Figura 8: Fotografia da antena quase pronta nos Estados Unidos.



Figura 9: Fotografia da antena já montada nos Estados Unidos.

BASIC DIPOLE

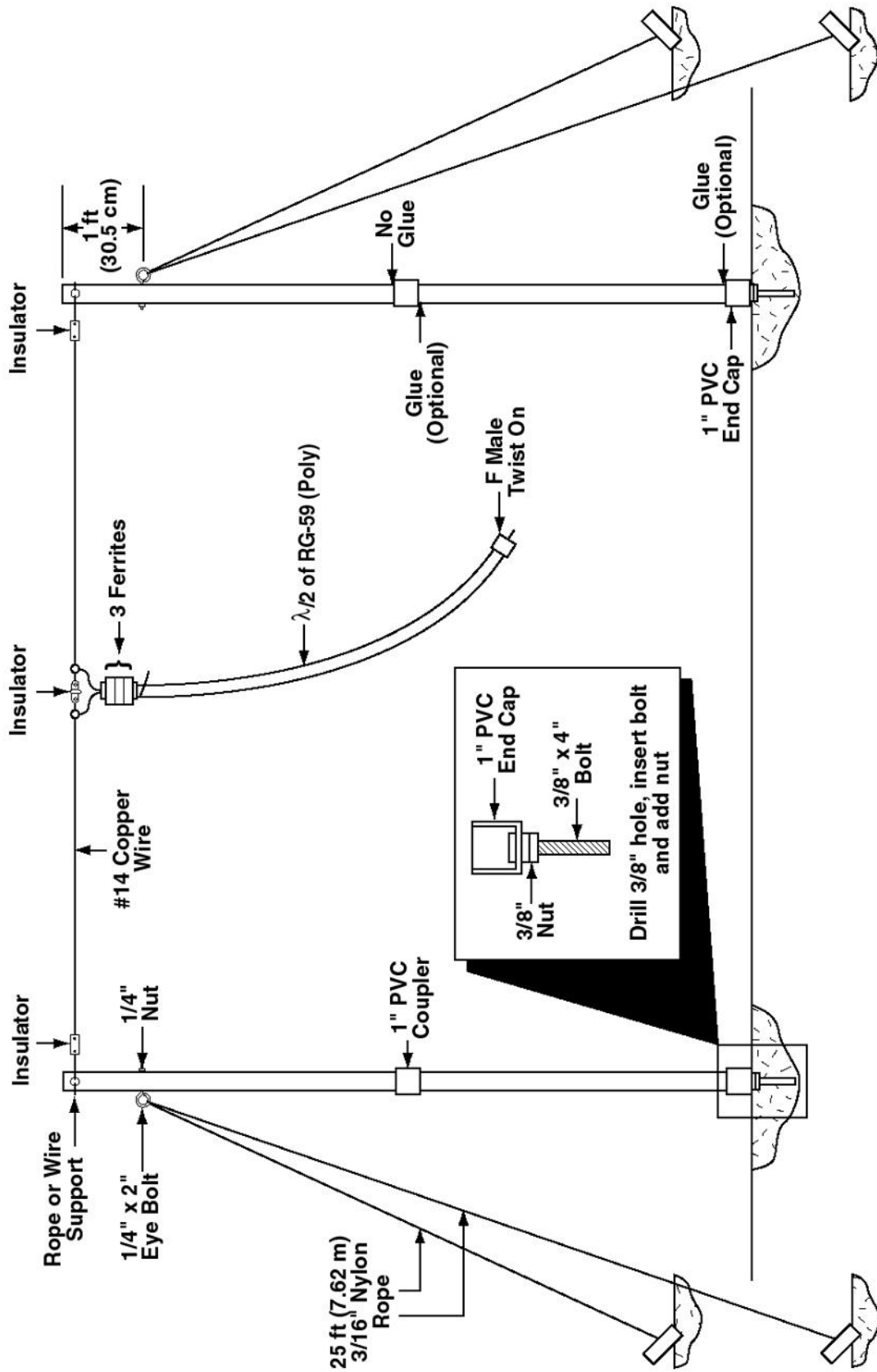


Figura 10: Diagrama da antena dipolo básica já montada.

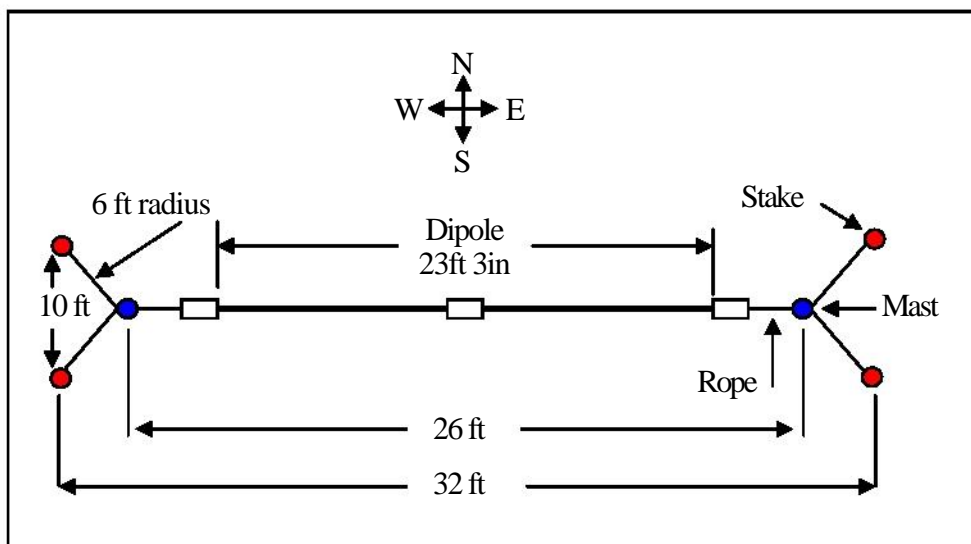


Figura 11: Desenho esquemático da antena dipolo mostrando uma vista superior para montagem, com dimensões e orientação geográfica, nos Estados Unidos.

- Em **quarto lugar** propomos a colocação do receptor-amplificador em uma sala de laboratório do IF-UFRGS. A antena dipolo, colocada externamente, será ligada por um cabo coaxial ao amplificador. Abaixo, na Figura 12, está um desenho esquemático das partes frontal e traseira do receptor (mostrando as entradas de sinal da antena e voltagem, e saída de áudio para o computador).

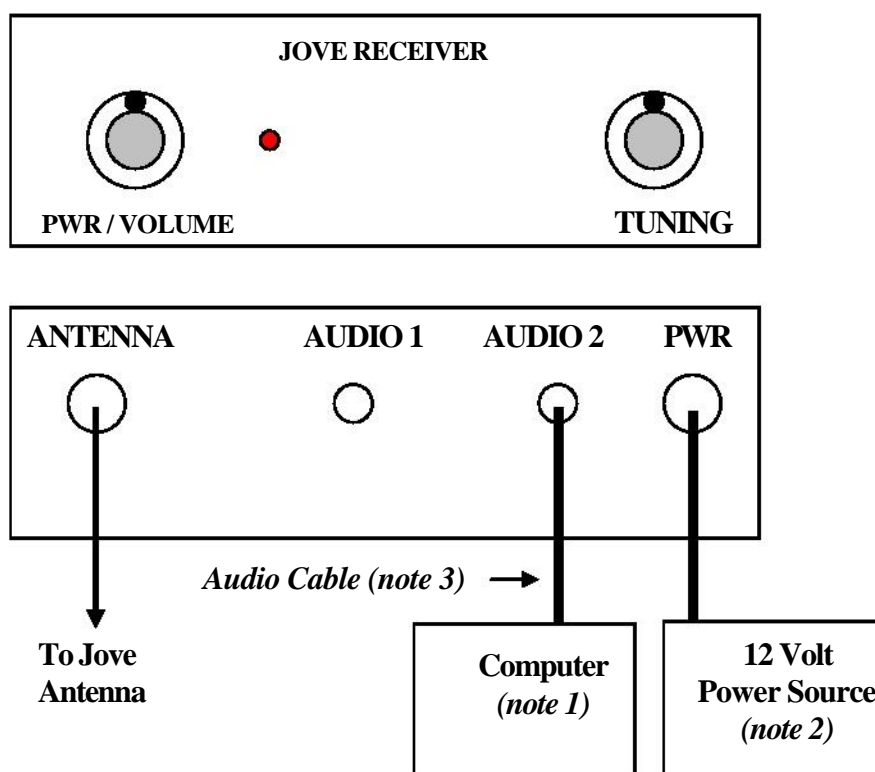


Figura 12: Desenho esquemático das partes frontal e traseira do receptor.

- Em **quinto lugar** propomos a instalação naquele laboratório do IF-UFRGS de um computador tipo PC com *hardware* simples e com sistema operacional MS-Windows. O receptor-amplificador rádio JOVE será ligado por um cabo serial à placa de som do computador. O usuário então processará as informações do Sol e de Júpiter obtidas pelo rádio-telescópio JOVE, montado no IF-UFRGS e também em outros lugares no mundo. Utiliza-se para isto o *software* essencial e gratuito Radio-SkyPipe (programa com várias características), assim como outros (rádio-espectrógrafo e calculadora de densidade de fluxo), sendo que apenas um, Radio-Júpiter Pro é não-gratuito. Abaixo, na Figura 13, está uma reprodução do *software* Radio-SkyPipe mostrando o traçado típico do efeito de conectar-se e desconectar-se a antena. Na Figura 14, está a reprodução do Radio-SkyPipe mostrando rádio-estouros solares em 2002. Cada rádio-estouro geralmente dura menos de 1 minuto. Rádio-estouros podem aparecer individualmente ou em grupos. Geralmente há mais atividade quando existem manchas solares visíveis na superfície do Sol.

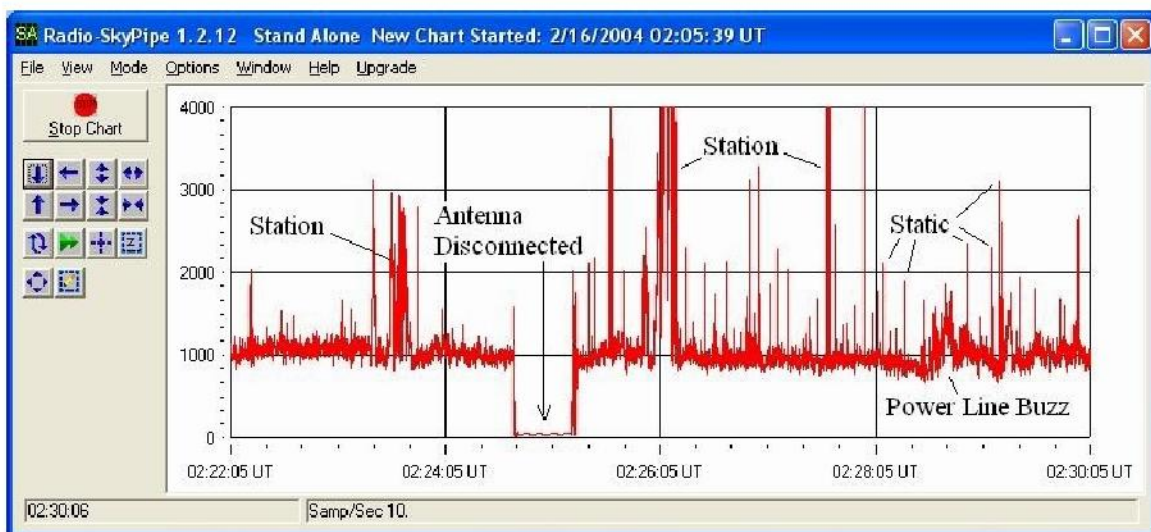


Figura 13: Reprodução do *software* Radio-SkyPipe mostrando o traçado típico do efeito de conectar-se e desconectar-se a antena.

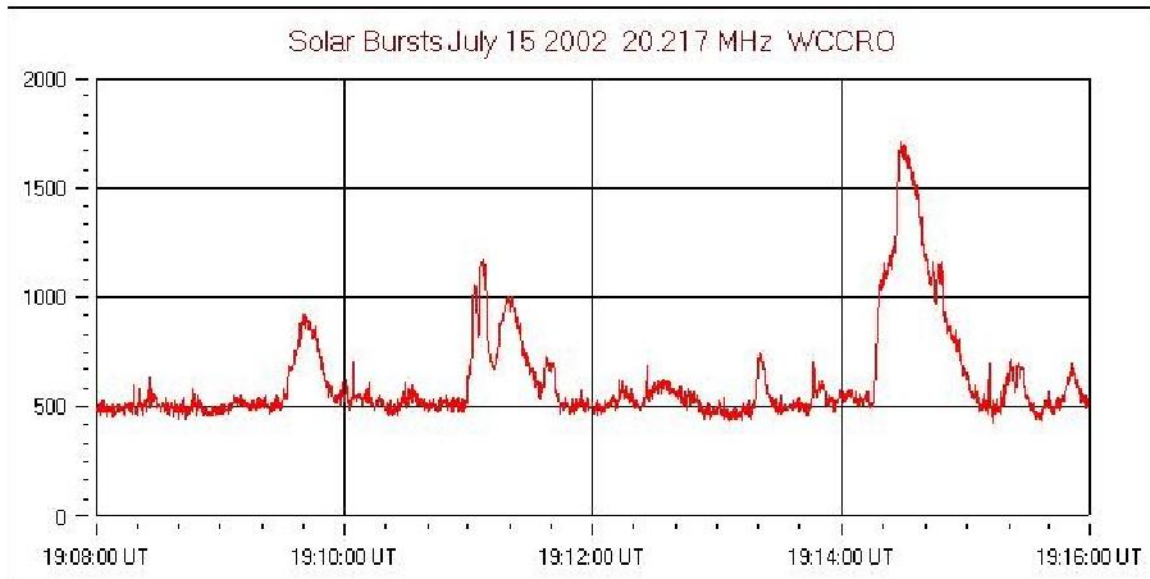


Figura 14: Reprodução do Radio-SkyPipe mostrando rádio-estouros solares em 2002.

- **Trabalho futuro - proposta:** Propomos que os dados do Sol e Júpiter processados pelos *software* sejam analisados e, com as conclusões obtidas pelos usuários, escrevam-se *papers* que sejam submetidos à publicação em *journals* da comunidade científica. Este projeto poderá ser realizado por este aluno e o Professor orientador (com a participação de outras pessoas) em um semestre letivo no IF-UFRGS e, em quaisquer épocas, por outras pessoas interessadas no IF-UFRGS e em quaisquer outras Universidades, escolas e centros de pesquisa no Brasil e no mundo.
 - Para o ensino de ciências, matemática e técnicas em escolas e Universidades é necessário apenas uma antena dipolo, para simplicidade do projeto.
 - Para começar-se a fazer ciência com qualidade é necessário haver no mínimo duas ou três antenas dipolo (para aumentar o ganho e fazer-se interferometria), sendo utilizado apenas um receptor-amplificador Radio JOVE.

- **Detalhamento financeiro:** Em termos financeiros, pode-se optar pela importação de todo o material necessário ao Radio Jove (receptor-amplificador, antenas, suportes, cabos, *software*, materiais extras) dos Estados Unidos. Abaixo, na Tabela 1, está detalhada a descrição do material e respectivos preços atuais. A ficha da ordem de compra do material e a ficha de inscrição gratuita para observadores Radio JOVE são encontradas no *site* do Radio JOVE [6].
 - Não são contados os valores das taxas de importação de produtos estrangeiros na Alfândega do Brasil.
 - É utilizada a taxa de câmbio média atual: (1 Dólar EUA) US\$ 1,00 = R\$ 2,00 (1 Real Brasil - Dólar Comercial).

DESCRIÇÃO DO MATERIAL	PREÇO EM DÓLARES	PREÇO EM REAIS
<p><u>Ítem # RJR: Kit Receptor (não-montado) Radio JOVE</u></p> <p>Inclui o kit eletrônico do receptor Radio JOVE, um manual de construção impresso, o CD de referência, e um CD educacional.</p>	US\$ 120	R\$ 240
<p><u>Ítem # RJB: Receptor (montado) Radio JOVE</u></p> <p>Inclui o receptor Radio JOVE montado e testado, o CD de referência, e um CD educacional.</p>	US\$ 250	R\$ 500
<p><u>Ítem # RJA: Kit Antena Radio JOVE</u></p> <p>Inclui um manual de construção impresso, fio da antena, conectores, combinadores de potência, isolantes, e o CD de referência. (Nota: Não inclui estruturas de suporte da antena).</p>	US\$ 35	R\$ 70
<p><u>Estruturas de Suporte da Antena</u></p>	US\$ 100	R\$ 200
<p><u>Ítem # RJC: CD de Referência Radio JOVE</u></p> <p>Este disco CD-R contém manuais Radio JOVE, o livro "Listening to Jupiter" de Richard Flagg, os mais recentes software para o Radio JOVE, e mais ítems.</p>	US\$ 15	R\$ 30
<p><u>Ítem # RJJ: CD Educacional Radio JOVE</u></p> <p>Este disco CD-R educacional multimídia,</p>	US\$ 15	R\$ 30

criado por Dr. Joseph Ciotti, contém interessantes apresentações sobre o "Básico da Rádio-Astronomia", "Júpiter como uma Fonte de Rádio", o "Rádio-Sol", e o "Fundo Cósmico".		
<u>Taxa de Remessa ao Brasil</u>	US\$ 40	R\$ 80

Tabela 1: Descrição do material do Radio JOVE, e preços referentes atuais.

Abaixo, na Tabela 2, temos como exemplos os preços totais para a compra do material completo com 1 receptor-amplificador Radio JOVE, nas seguintes formas:

DESCRIÇÃO (EXEMPLOS)	QUANTIDADE DE ANTENAS DIPOLO	TOTAL EM DÓLARES	TOTAL EM REAIS
Kit Receptor (não-montado) (Ítem # RJR) + Kit Antena (Ítem # RJA) + Estruturas de Suporte da Antena + Taxa de Remessa ao Brasil	1	US\$ 295	R\$ 590
	2	US\$ 330	R\$ 660
	3	US\$ 365	R\$ 730
	4	US\$ 400	R\$ 800
Receptor (montado e testado) (Ítem # RJB) + Kit Antena (Ítem # RJA) + Estruturas de Suporte da Antena + Taxa de Remessa ao Brasil	1	US\$ 425	R\$ 850
	2	US\$ 460	R\$ 920
	3	US\$ 495	R\$ 990
	4	US\$ 530	R\$ 1.060

Tabela 2: Exemplos dos preços totais ao compra-se material do Radio JOVE.

Os pagamentos podem ser feitos através de cheque, ordem de pagamento internacional, e pelo banco *Western Union*. Não são aceitos pagamentos por cartões de crédito e *wire transfer*. O material é remetido dos Estados Unidos ao Brasil por *Priority Mail*, e a entrega dá-se em 4 ou 5 semanas (uma semana para o receptor-amplificador já montado). Não é contado o tempo de permanência do material na Alfândega do Brasil.

O projeto Radio JOVE é uma ótima pesquisa prática para o desenvolvimento do ensino, e da ciência e tecnologia nas escolas e Universidades no Brasil.

RESULTADOS

Como não tivemos condições de financiamento para importar material dos Estados Unidos, não foi possível construir o rádio JOVE. Como dissemos anteriormente, este Trabalho de Conclusão de Curso objetiva propor a grupos interessados a futura construção e operação deste rádio-telescópio. Os resultados da rádio-astronomia do Sol e de Júpiter mostrados a seguir foram obtidos há alguns anos por grupos nos Estados Unidos, utilizando-se o rádio-telescópio JOVE e o *software* Radio-SkyPipe, entre outros. Foram principalmente utilizados dados de 2002 pois são bem ilustrativos.

Sol

Abaixo, na Figura 15, estão gráficos obtidos através do Radio-SkyPipe mostrando rádio-estouros solares do Tipo III típicos, detectados pelo Rádio JOVE em alguns lugares nos Estados Unidos, em 2002. Nesta Figura 15, no segundo espectro de baixo para cima, nota-se efeito de diminuição da intensidade do sinal devido à ionosfera terrestre. No eixo das abcissas está a marcação de tempo em segundos, em horário de Tempo Universal (UT). No eixo das ordenadas está a temperatura em graus Kelvin (K) da emissão. Tal sistema de coordenadas é utilizado tanto para o estudo do Sol quanto o de Júpiter. Tudo emite ondas eletromagnéticas em proporção à temperatura física. A temperatura do Sol na superfície da fotosfera é de 5.778 K. O "Sol Quietamente", isto é, o Sol quando está em um período de baixa atividade de manchas solares é facilmente detectado a frequências de microondas onde suas emissões térmicas são as mais fortes (considerando-se apenas a região de ondas de rádio no espectro eletromagnético) [7]. Ao considerar-se todo o espectro eletromagnético associado ao Sol, esta estrela tem sua emissão térmica mais forte na região visível do espectro. Feixes de elétrons viajando através da coroa solar excitam ondas de Langmuir perto da frequência de plasma eletrônico local. Ondas de Langmuir são oscilações longitudinais de plasma.

Em ondas na forma $\Delta = \Delta_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$, ondas de Langmuir são governadas por

$$\omega^2 = c_s^2 k^2 + \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \quad \text{onde } n_e \text{ é a densidade eletrônica e } m_e \text{ é a massa do elétron.}$$

Quando essas ondas de Langmuir são convertidas em ondas eletromagnéticas, a radiação pode ser detectada por rádios-telescópios como rádio-estouros com assinaturas espectrais muito específicas que dependem da estrutura magnética que guiam esses

feixes. Isto é, um feixe de elétrons que propaga-se para fora do Sol ao longo de campos magnéticos abertos produzem um curto pulso de emissão a frequências sistematicamente decrescentes enquanto o feixe avança para plasmas cada vez mais tênues. Tal emissão é freqüentemente observada em ondas decimétricas a quilométricas, e é chamada de estouro Tipo III [8]. No Tipo III as frequências rapidamente derivam de altas para baixas, podendo exibir padrões harmônicos, e freqüentemente acompanham a fase *flash* de grandes explosões solares. Na Figura 16, está um espectro mostrando eventos rádio-estouros de explosões solares do Tipo III típicos, detectados pelo Rádio JOVE nos Estados Unidos, em 2002. Na Figura 17, estão dois espectros de um grupo de manchas solares através do Radio-SkyPipe mostrando rádio-estouros solares do Tipo III típicos, em duas frequências diferentes (20,1 MHz e 144,1 MHz), detectados pelo Rádio JOVE nos Estados Unidos, em 2002. Na Figura 18, está um desenho mostrando um cenário de interação de Ejeção de Massa Coronal (CME) do Sol e a criação de linhas transientes de campo magnético aprofundado na fotosfera. CMEs são ejeções de material da coroa solar. O material ejetado é plasma constituído principalmente de elétrons e prótons (também havendo pequenas quantidades de elementos mais pesados como hélio, oxigênio e ferro), e campo magnético imerso dentro da coroa solar. O desenho superior mostra uma CME acontecida perto da meia-noite, e o desenho inferior uma CME acontecida com o rádio-evento (rádio-estouro solar) JOVE, enquanto interage com a configuração de campo magnético criada pela CME da meia-noite. Reconexão entre essas duas estruturas é sugerida para criar-se os feixes de elétrons que escapam ao longo das linhas transientes de campo magnético da primeira CME. Na Figura 19, estão fotografias de observações pela sonda espacial SoHO (Solar and Heliospheric Observatory) (coroagrafo LASCO) em órbita do Sol [8,9] de uma CME acontecida em torno de 8 horas antes de um rádio-evento e sua evolução até o tempo do rádio-evento incluindo um rádio-estouro decamétrico. Note a evolução contínua de estruturas em forma de laço de grande escala nas duas imagens (à esquerda e ao meio), tomada perto do tempo do rádio-evento, na imagem à direita. Na primeira fotografia à esquerda vê-se um grande arco de plasma se expandindo e sendo guiado pelas linhas de campo magnético do Sol que também expandem-se; na fotografia ao meio, obtida 24 minutos depois, vê-se este arco muito maior; e na fotografia à direita, obtida 7 horas depois da segunda e processada digitalmente para mostrar-se detalhes, vê-se o momento da desconexão de linhas de campo magnético muito expandidas e o *flash* da emissão de plasma (três setas indicativas) ao vácuo (formando "vento solar") - neste momento há o rádio-estouro. Se elétrons são injetados em um grupo de linhas de campo magnético que são estreitas na coroa solar inferior mas tornam-se cada vez maiores com altura crescente, pode-se entender porque a parte de baixa frequência do rádio-espectro perde a forma característica de um N (forma Tipo N), porque rádio-estouros individuais vindos de densidades diferentes misturam-se em um quasi-contínuo, formando um espectro mais suave. Na Figura 20, a imagem em ultra-violeta extremo do Sol é em apenas um comprimento de onda ($\lambda_1 = 30,4$ nm (nanômetro)), enquanto na Figura 21, a imagem em ultra-violeta extremo do Sol é composta por três imagens em comprimentos de ondas diferentes ($\lambda_1 = 17,1$ nm, $\lambda_2 = 19,5$ nm, e $\lambda_3 = 28,4$ nm) (SoHO). Estas Figuras 20 e 21 mostram o início de algumas CMEs, cujas linhas de campo magnético associadas estão começando a expandir-se para longe da fotosfera do Sol [9]. Após algumas horas há os rádio-estouros solares que são detectados também pelos rádio-telescópios Radio JOVE. Assim nota-se a grande importância do uso do Radio JOVE no estudo astrofísico do Sol.

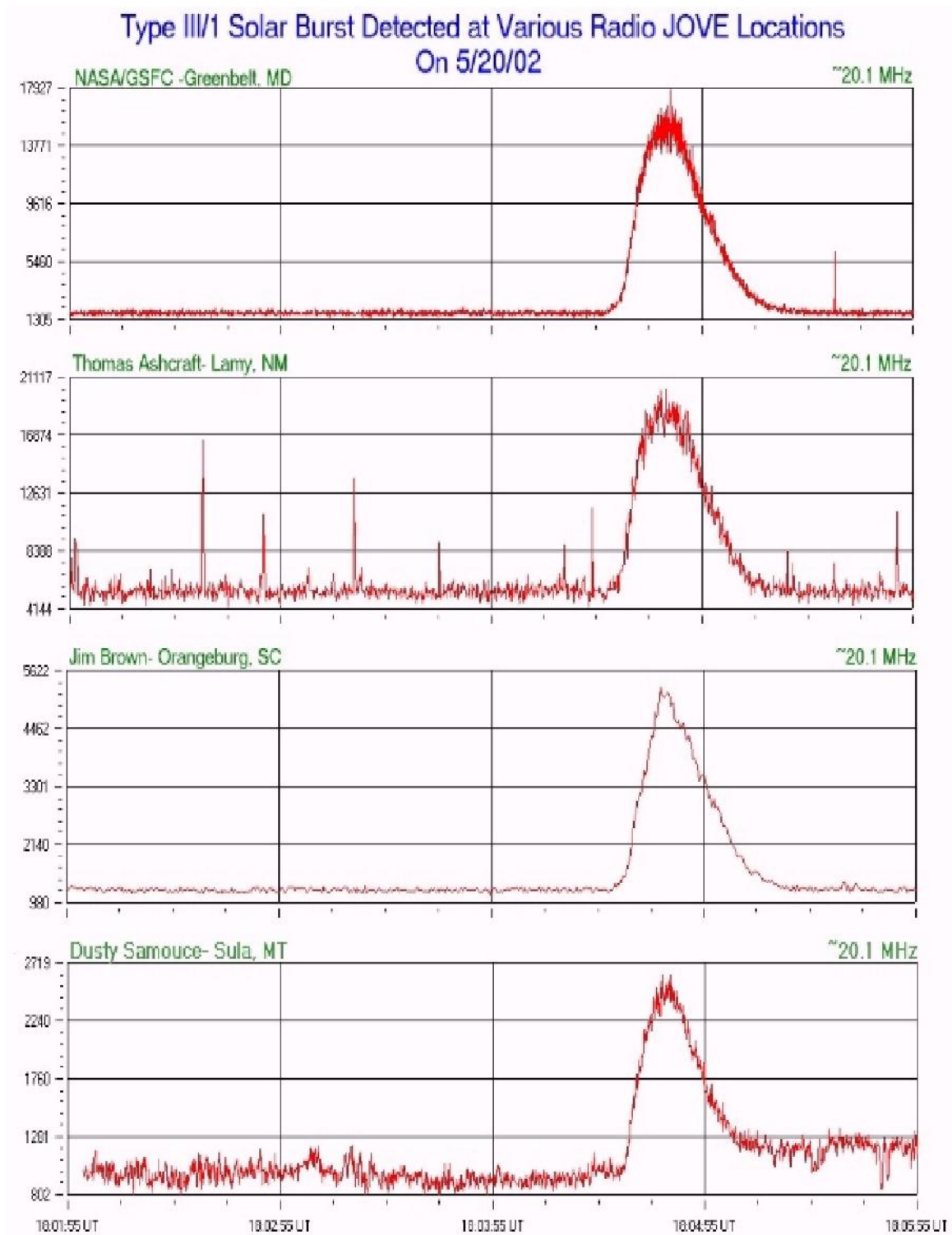


Figura 15: Gráficos obtidos através do Radio-SkyPipe mostrando rádio-estouros solares do Tipo III típicos, detectados pelo Radio JOVE em alguns lugares, em 2002.

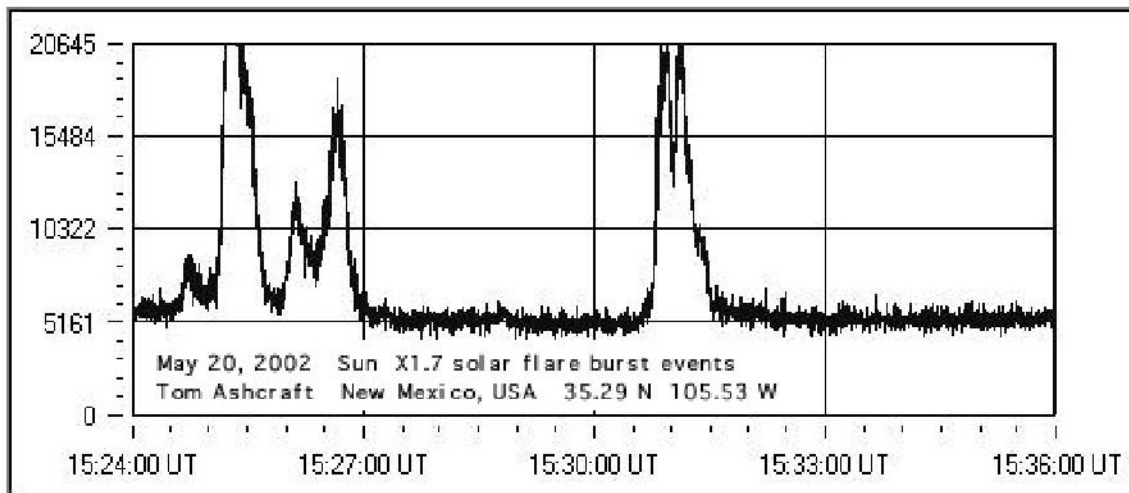


Figura 16: Espectro mostrando eventos rádio-estouros de explosões solares do Tipo III típicos, detectados pelo Rádio JOVE nos Estados Unidos, em 2002.

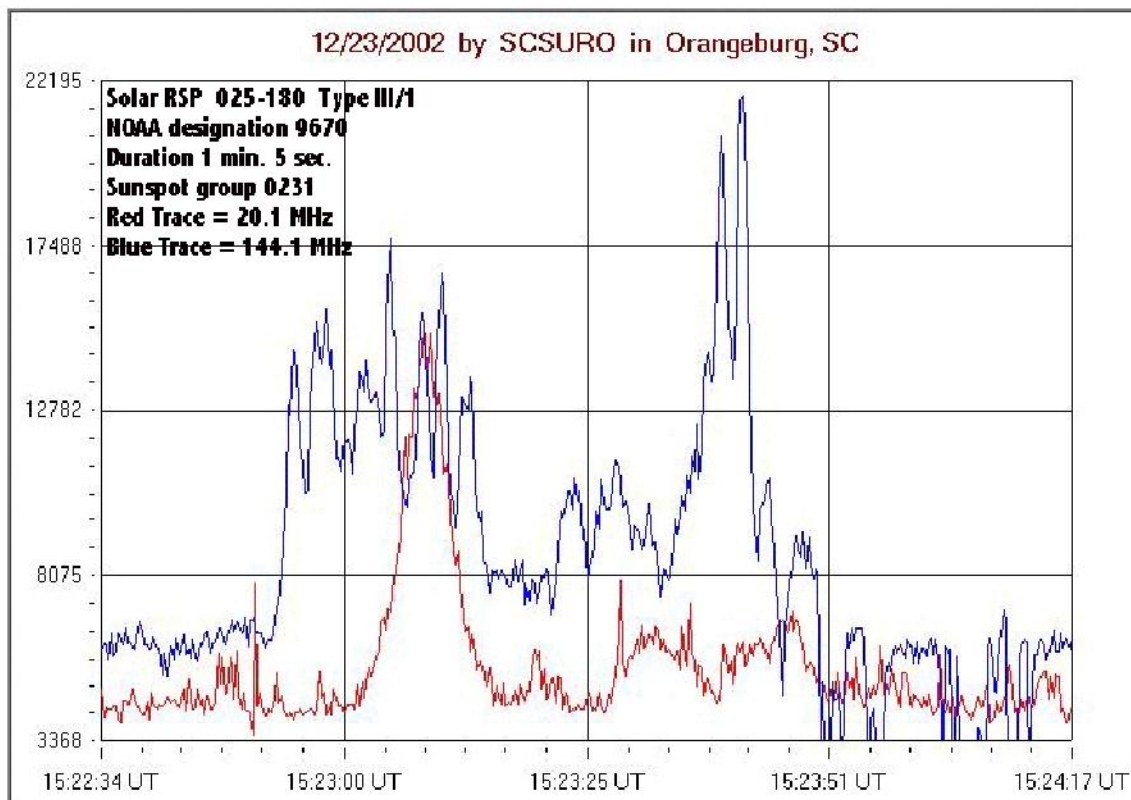


Figura 17: Dois espectros de um grupo de manchas solares através do Radio-SkyPipe mostrando rádio-estouros solares do Tipo III típicos, em duas frequências diferentes (20,1 MHz e 144,1 MHz), detectados pelo Rádio JOVE nos Estados Unidos, em 2002.

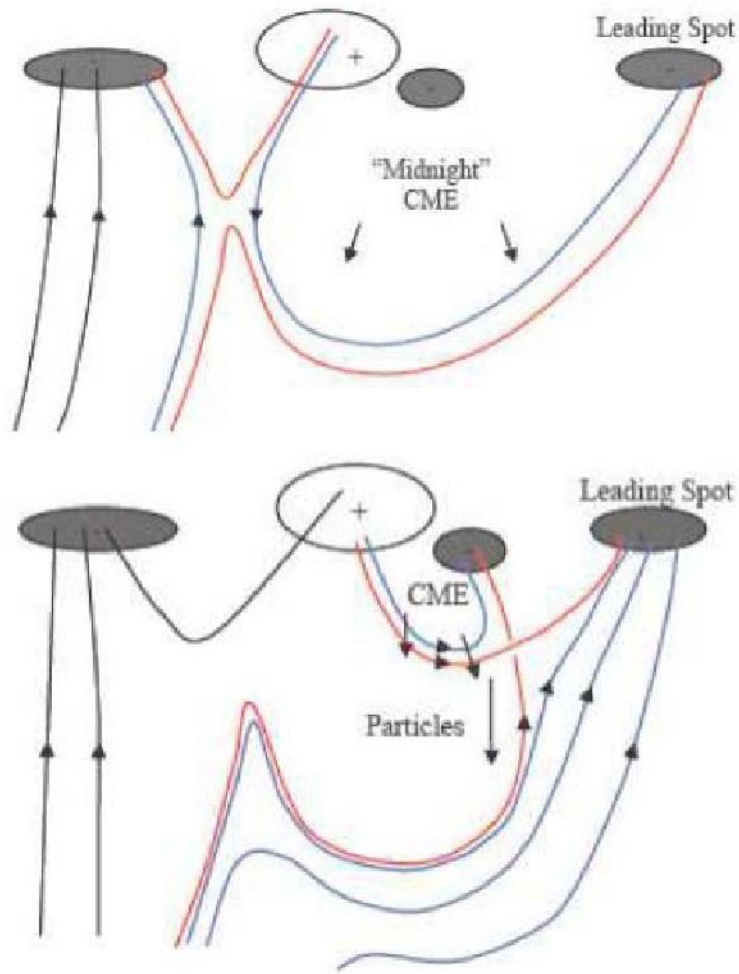


Figura 18: Desenho mostrando um cenário de interação de Ejeção de Massa Coronal do Sol e a criação de linhas transientes de campo magnético aprofundadas na fotosfera.

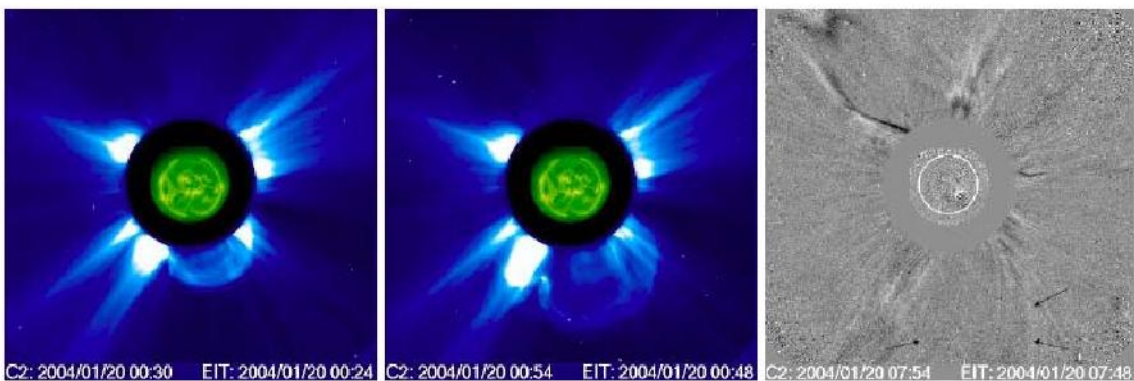


Figura 19: Fotografias de observações pela sonda espacial SoHO (coroagrafo LASCO) em órbita do Sol de uma CME acontecida em torno de 8 horas antes de um rádio-evento (rádio-estouro solar) e sua evolução até o tempo do rádio-evento incluindo um rádio-estouro decamétrico. Note a evolução contínua de estruturas em forma de laço de grande escala nas duas imagens (à esquerda e ao meio), tomada perto do tempo do rádio-evento, na imagem à direita.

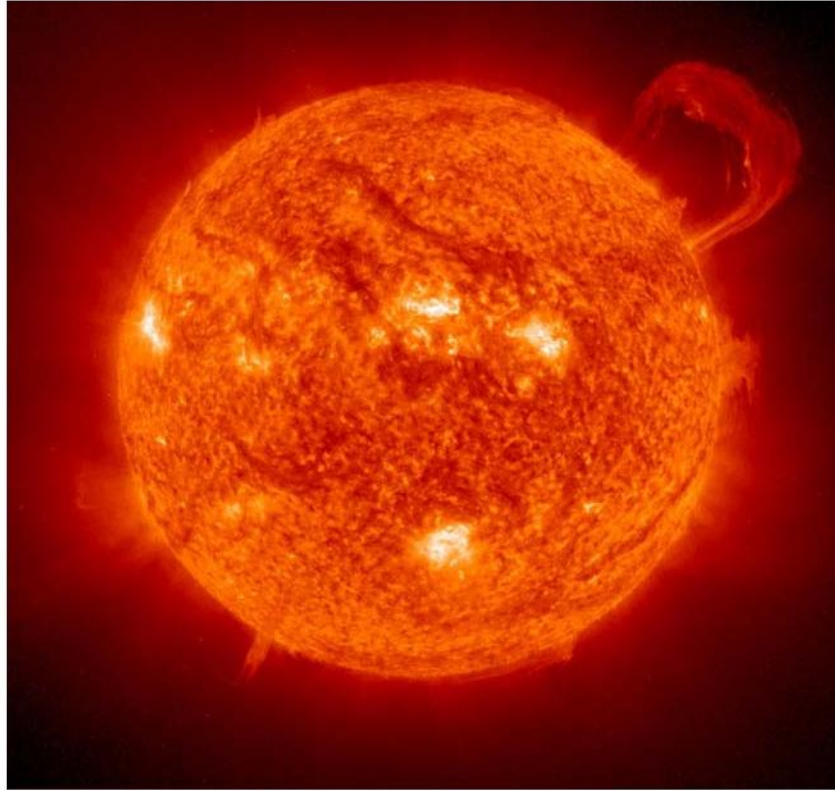


Figura 20: Fotografia em ultra-violeta extremo (30,4 nm) do Sol (SoHO).

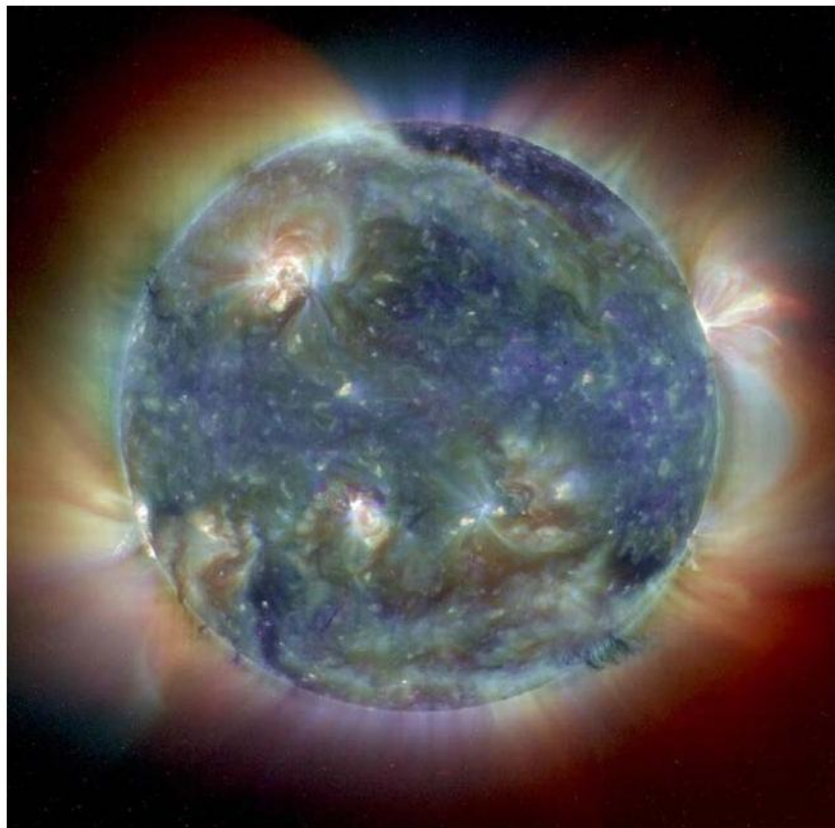


Figura 21: Fotografia em ultra-violeta extremo (17,1 nm, 19,5 nm, 28,4 nm) do Sol (SoHO).

Júpiter

Abaixo, na Figura 22, estão vários espectros observados através do Radio-SkyPipe mostrando rádio-estouros de uma tempestade eletromagnética Júpiter - Io-B, detectados pelo Radio JOVE em lugares diferentes nos Estados Unidos, no mesmo intervalo de tempo (12 min) em 2002. Júpiter tem dois rádio-estouros sonoros muito distintos. Alguns rádio-estouros são chamados de rádio-estouros longos, ou rádio-estouros L, e eles soam como ondas quebrando no oceano. Os outros tipos de rádio-estouros são chamados de rádio-estouros curtos, ou rádio-estouros S, e soam como pipoca estalando. Júpiter não faz estes sons todo o tempo. Ao invés disto, os rádio-estouros vêm em rádio-tempestades. Observando estas rádio-tempestades eletromagnéticas durante muito tempo, descobriu-se que existe uma maior ou menor chance de detectar-se uma rádio-tempestade dependendo da Longitude Meridional Central (CML) de Júpiter, isto é, qual lado de Júpiter está orientado a Terra, e a fase de Io, que diz onde Io (uma lua vulcânica de Júpiter) está na órbita em torno de Júpiter, relativamente a Terra. A CML é a posição angular de um ponto de referência na superfície de Júpiter, medida no sistema longitudinal deste, em relação à linha de visada entre a Terra e Júpiter. É medida como no movimento dos ponteiros de um relógio. A fase de Io é a medida da posição de Io relativa a Júpiter e a Terra. É medida como no movimento contrário aos ponteiros de um relógio desde a posição que está a 180° para longe da CML. Na Figura 23, está um diagrama mostrando a CML perto de 135° (retas azuis com ângulos), e a fase de Io perto de 30° (seta curva preta). Na Figura 24, está um diagrama que mostra a "plotagem de probabilidade", isto é, a probabilidade de detectar-se rádio-tempestades de Júpiter em função de ambas - a CML e a fase de Io. As regiões vermelhas e amarelas indicam uma alta probabilidade, enquanto as regiões azuis indicam uma baixa probabilidade. Existem três distintas regiões de rádio-tempestades eletromagnéticas com alta probabilidade de acontecerem, chamadas Io-A, Io-B, e Io-C. Como os períodos da rotação de Júpiter e da revolução de Io em torno de Júpiter são conhecidos, pode-se calcular ambas CML e fase de Io e prever os melhores tempos para observar-se Júpiter. Um *software* para prever tais rádio-tempestades encontra-se disponível no *site* do Radio JOVE [5]. As rádio-tempestades eletromagnéticas Io-A, B, e C têm diferentes características de rádio-estouros. As rádio-tempestades Io-A são mais rádio-estouros L, as rádio-tempestades Io-B são mais rádio-estouros S, enquanto as rádio-tempestades Io-C geralmente possuem ambos os tipos de rádio-estouros. Em adição a isto, os sinais de rádio de ambas rádio-tempestades Io-A e Io-B são polarizadas circularmente para a direita, enquanto as das rádio-tempestades Io-C são polarizadas circularmente para a esquerda.

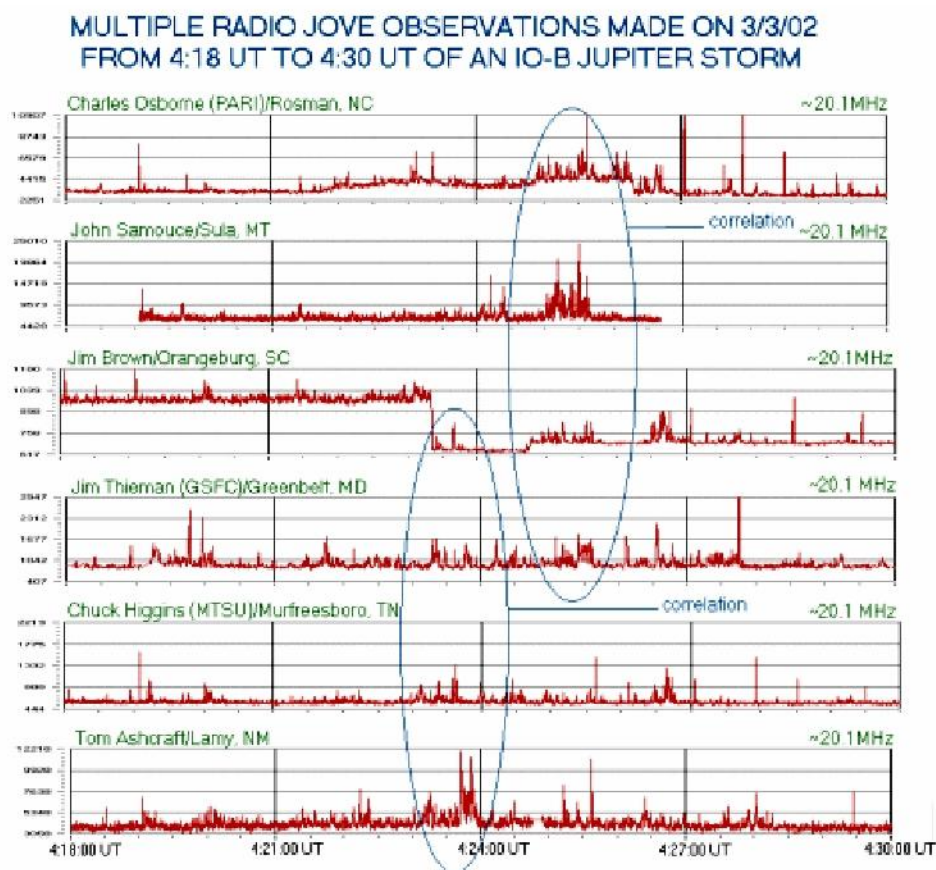


Figura 22: Vários espectros observados através do Radio-SkyPipe mostrando rádio-estouros de uma rádio-tempestade Júpiter - Io-B, detectados pelo Rádio JOVE em lugares diferentes nos Estados Unidos, no mesmo intervalo de tempo (12 min) em 2002.

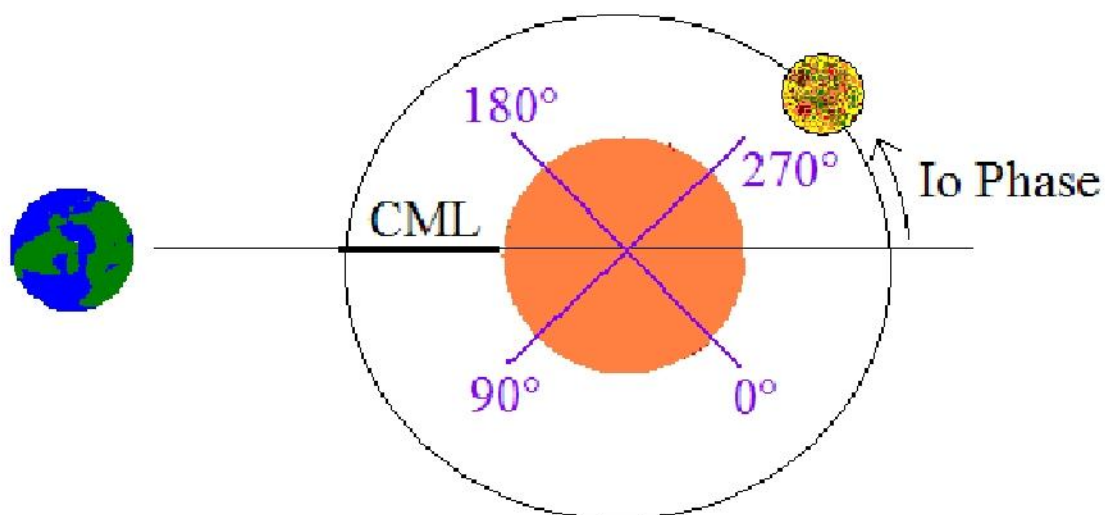


Figura 23: Neste diagrama, a fase de Io está perto de 30° (seta curva preta), e a CML de Júpiter está perto de 135° (retas azuis com ângulos).

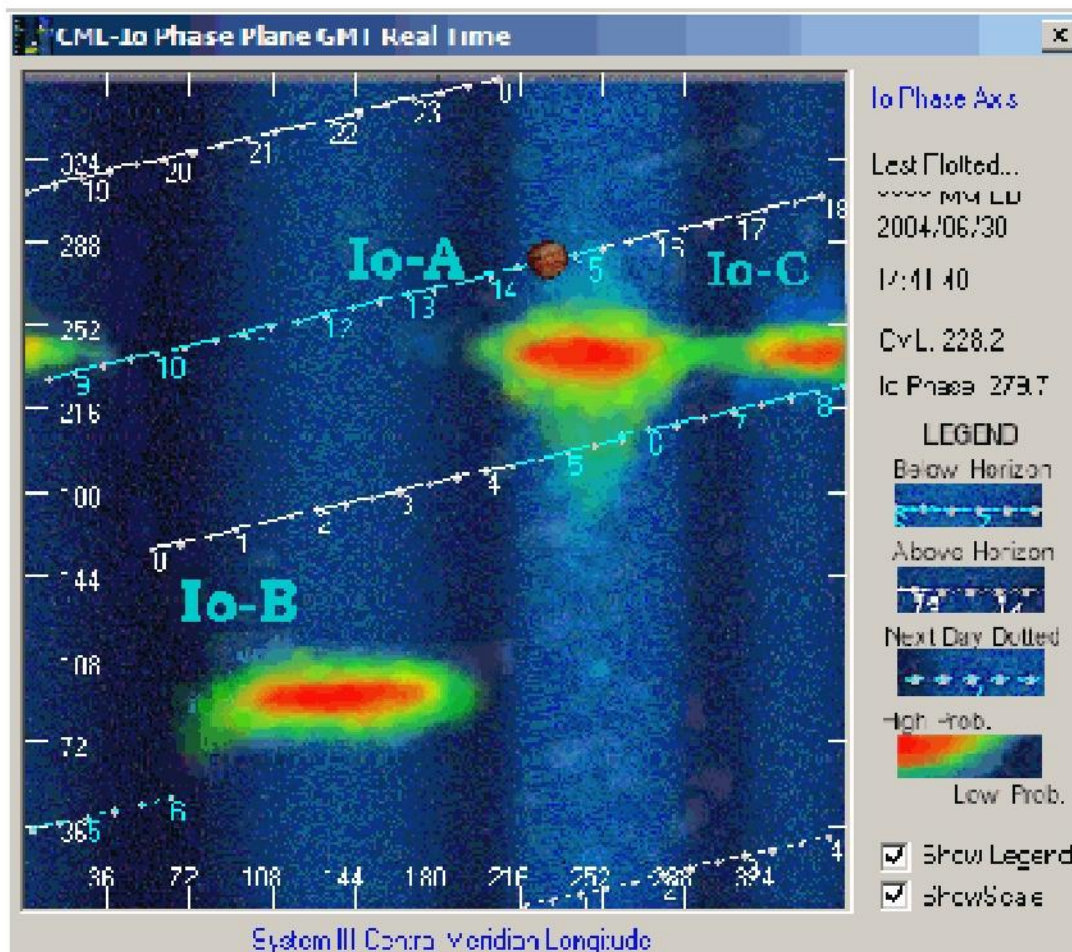


Figura 24: Gráfico mostrando uma "plotagem de probabilidade" de detectar-se rádio-estouros de Júpiter. As regiões vermelhas e amarelas indicam uma alta probabilidade, enquanto as regiões azuis indicam uma baixa probabilidade.

De onde vêm os sinais de rádio de Júpiter ? Bem, parte da resposta tem à ver com Io, a lua vulcânica de Júpiter. Io tem os maiores vulcões ativos no Sistema Solar, e as erupções constantemente expulsam partículas, principalmente enxofre e oxigênio, ao vácuo do espaço. A energia da radiação solar ioniza este material (joga fora os elétrons destes átomos ao espaço) causando a formação de um *torus* de plasma na órbita de Io. *Torus* é uma forma geométrica que assemelha-se a uma câmara de pneu cheia. O *torus* de plasma de Io é uma coleção de partículas carregadas eletricamente na forma de pneu orbitando Júpiter e centrado na órbita de Io. Os elétrons são atraídos ao campo magnético de Júpiter, formando uma mistura de plasma e campo magnético (conhecido como magnetosfera), e fluem ao longo das linhas de campo magnético até atingirem a atmosfera de Júpiter. Neste processo, eles espiralam e irradiam energia através de um processo chamado radiação *sincrotron*, que é a energia emitida por partículas carregadas quando espiralam em torno de linhas de campo magnético. E quando os elétrons aproximam-se do topo da atmosfera de Júpiter, a radiação *sincrotron* está na forma de sinais de rádio. Acredita-se que os sinais de rádio são emitidos como em um cone. Enquanto Júpiter tem sua rotação, o cone ocasionalmente passa pela linha de visada entre Júpiter e a Terra. Entretanto, rádio-telescópios podem somente captar os sinais de rádio se a borda do cone estiver apontado em direção a Terra. Abaixo, na

Figura 25, está um desenho fotográfico mostrando que as emissões de rádio de Júpiter têm a geometria de um cone. E ligando os pólos norte de Júpiter ao norte de Io, e os

pólos sul de Júpiter ao sul de Io os elétrons formam uma corrente elétrica estimada em 5×10^6 A. Na Figura 26, estão fotografias mostrando que a lua Io de Júpiter tem os maiores vulcões ativos no Sistema Solar. As plumas vulcânicas são as fontes de partículas que são responsáveis pelos rádio-estouros de Júpiter. Na Figura 27, estão fotografias mostrando a observação de Júpiter em um comprimento de onda de luz emitida por íons de enxofre, podendo-se ver claramente o *torus* de plasma circundando Júpiter. Na Figura 28, está um espectro em vermelho (de uma observação em uma única frequência), em 20,1 MHz, mostrando uma rádio-tempestade eletromagnética Io-A observada em junho de 2004 com um rádio-telescópio Radio JOVE. Os picos de maior energia (mais térmicos) que você vê são rádio-estouros L, enquanto todos os outros picos pequenos são ruído. Na Figura 29, estão gráficos onde o de cima e o de baixo mostram uma rádio-tempestade eletromagnética Io-B observada em fevereiro de 2004 com o espectrógrafo da University of Florida, Estados Unidos. Ambas imagens foram tiradas dos arquivos de dados *online* do Radio JOVE, acessíveis à todos. Os dois gráficos azuis são observações em multi-frequências - espectrogramas - de rádio-tempestades. No eixo das abcissas está o tempo, em horário de Tempo Universal (UT). No eixo das ordenadas está a frequência em MHz. As cores mostram a intensidade do sinal. Rádio-estouros no espectrograma aparecem muito diferentes dos gráficos em frequências únicas. O espectrograma de cima ilustra como se parece um rádio-estouro L. Aparecem como faixas largas inclinadas. A inclinação significa que se você estivesse observando à 24 MHz e seu colega estivesse observando à 28 MHz, vocês mediriam picos de rádio-estouro L com tempos um pouco diferentes. O espectrograma de baixo ilustra um fenômeno interessante chamado pista de modulação. Estas pistas são linhas inclinadas em um rádio-espectrograma de Júpiter que indicam um desvio de frequência nos rádio-estouros de Júpiter. São causadas pelo sinal de rádio viajando através de um campo magnético e sendo inclinado por ele. Estas figuras - pistas de modulação - nas regiões de rádio-estouros no espectrograma de Júpiter podem ter ambas inclinações positivas e negativas. As pistas de modulação são interessantes porque dão informação sobre o campo magnético de Júpiter e a densidade de plasma dentro do *torus* de plasma de Io. Quando os sinais de rádio são emitidos, eles devem viajar através do campo magnético de Júpiter para atingir a Terra, e a interação entre as ondas eletromagnéticas de rádio e o campo magnético de Júpiter causa as inclinações de rádio-estouros observadas nos espectrogramas de Júpiter. As inclinações exatas que formam-se dependem da força do campo magnético, e do tamanho e ângulo do cone de emissão, etc.. Utilizando-se modelos computacionais, tentam-se diferentes valores para cada um desses parâmetros para ver-se quais números recriam as observações. Uma descoberta, utilizando-se este processo, é que as rádio-tempestades Io-A e Io-B vêm do hemisfério norte de Júpiter, enquanto as rádio-tempestades Io-C vêm do hemisfério sul de Júpiter [5]. O usuário pode fazer pesquisa científica importando dados dos *software* Radio-SkyPipe (frequência única) e Radio Spectrograph (múltiplas frequências), gratuito, colocando-os no pacote de *software* científico Interactive Data Language (IDL) [10], não-gratuito, e medir-se as inclinações das pistas de modulação nos dados dos espectrogramas de Júpiter para compará-las às medições anteriores. Utiliza-se o IDL para medir-se as inclinações das pistas de modulação na tela do computador. Na Figura 30, está uma fotografia em infravermelho e luz visível de Júpiter e Io obtida em 2007 pela sonda New Horizons [11]. Vê-se erupções vulcânicas em Io, responsáveis pelos rádio-estouros de Júpiter. Assim nota-se a grande importância do uso do rádio-telescópio JOVE no estudo astrofísico de Júpiter e suas luas geologicamente ativas.

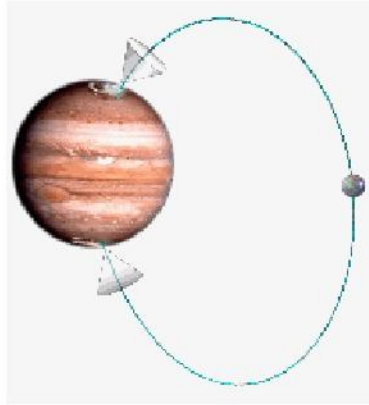


Figura 25: Desenho fotográfico mostrando que as emissões de rádio de Júpiter vêm na geometria de cones.



Figura 26: Fotografias mostrando que a lua Io de Júpiter tem os maiores vulcões ativos no Sistema Solar. As plumas vulcânicas são as fontes de partículas que são responsáveis pelos rádio-estouros de Júpiter.

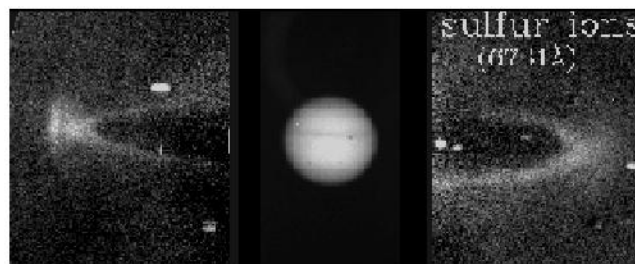


Figura 27: Fotografias mostrando a observação de Júpiter em um comprimento de onda de luz emitida por íons de enxofre, podendo-se ver claramente o *torus* de plasma circundando Júpiter.

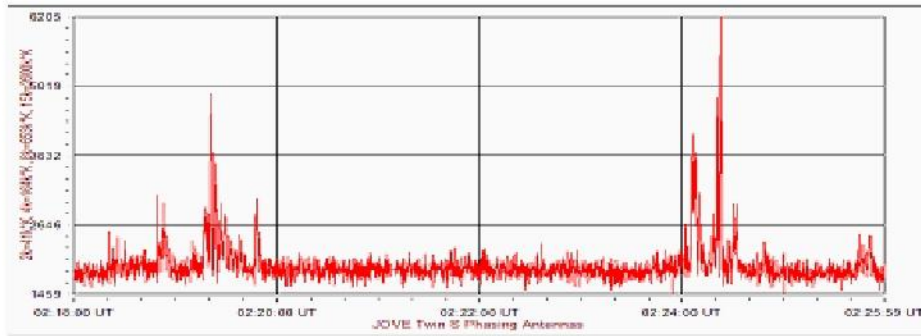


Figura 28: Espectro mostrando uma rádio-tempestade eletromagnética Io-A observada, em 20,1 MHz, em junho de 2004, com um rádio-telescópio Radio JOVE.

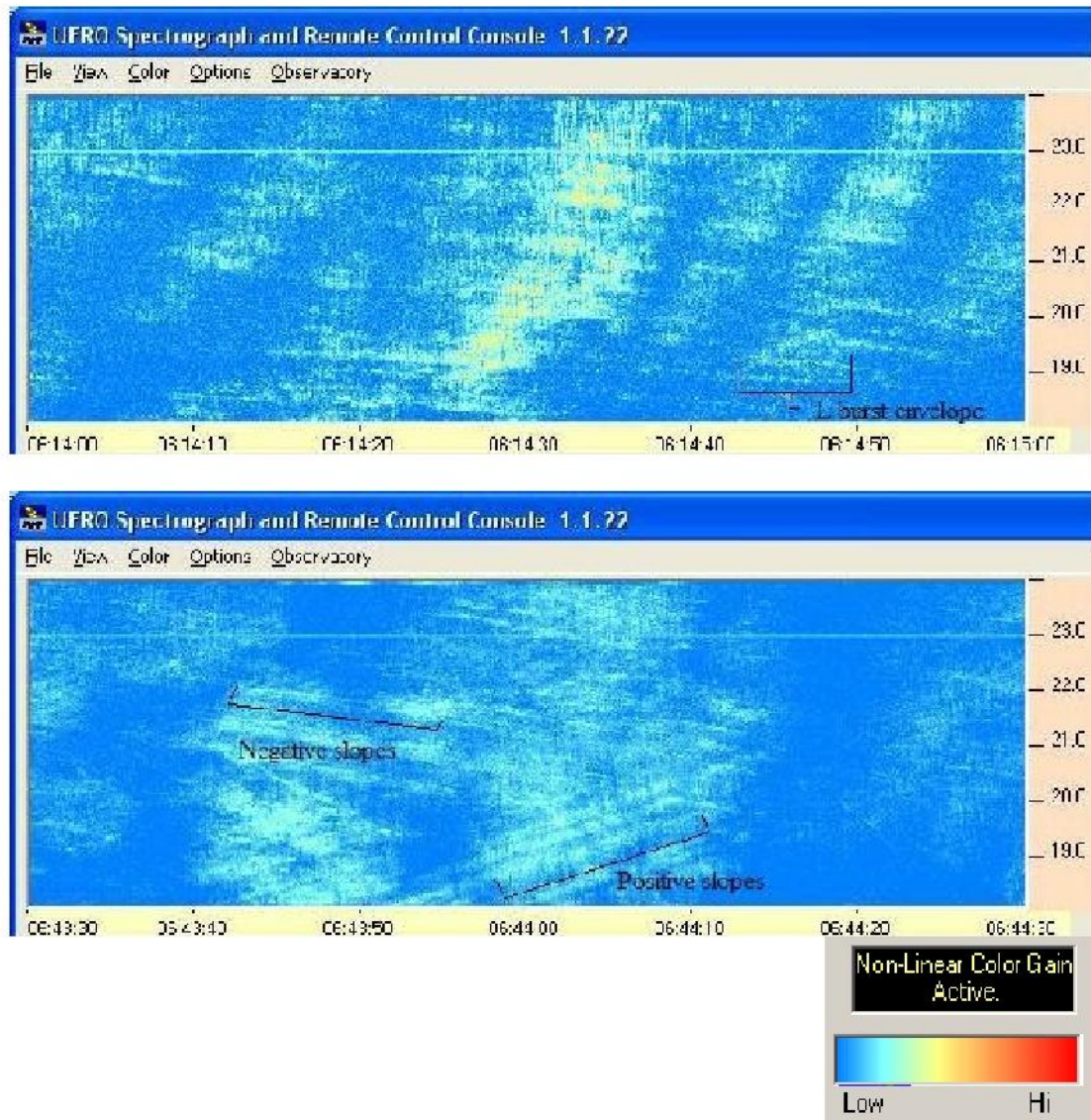


Figura 29: Os gráficos de cima e de baixo mostram uma rádio-tempestade eletromagnética Io-B observada nos Estados Unidos, em fevereiro de 2004.

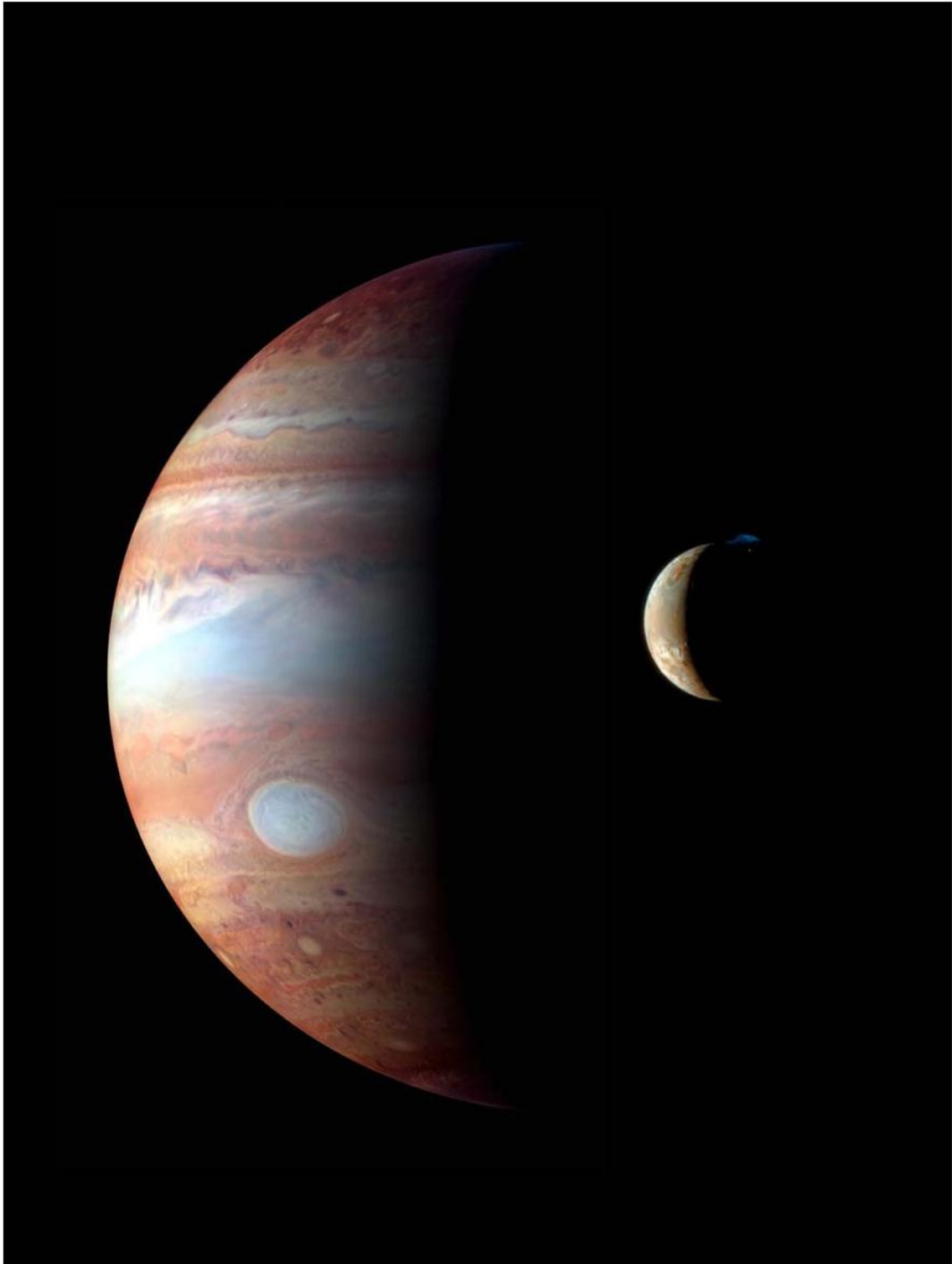


Figura 30: Fotografia em infravermelho e luz visível de Júpiter e Io (New Horizons).

CONCLUSÕES

Vimos que o projeto Radio JOVE é orientado à estudantes, professores, cientistas, engenheiros, técnicos, grupos, Universidades, escolas e centros de pesquisas no mundo. É economicamente viável, e o retorno pedagógico, científico e técnico é bem grande. No estudo do Sol o Radio JOVE contribui de forma marcante, juntamente com observatórios profissionais e sondas espaciais, à astrofísica solar e também ao estudo da interação Sol - Terra que é responsável pela comunicação, clima e vida neste planeta. No estudo de Júpiter o Radio JOVE contribui de forma marcante, aliado à observatórios e sondas espaciais, à astrofísica joviana e também à astrobiologia [12,13].

REFERÊNCIAS

- [1] (Página 1) Jansky K. G., "Electrical disturbances apparently of extraterrestrial origin," In *Proceedings of IEEE*, **86**, 7, pp. 1510-1515 (1998).
- [2] (Página 1) Hey J. S., "*The Radio Universe*," 2nd ed., Pergamon Press, New York (1975).
- [3] (Página 1) Burke B. F. and Franklin K. L., "Observations of variable radio source associated with the planet Jupiter," *J. Geophys. Res.*, **60**, pp. 213-217 (1955).
- [4] (Página 1) Jackson J. D., "*Classical Electrodynamics*," 3rd ed., John Wiley & Sons, New Jersey (1998).
- [5] (Páginas 2, 23 e 26) National Aeronautics and Space Administration, Gordon Space Flight Center, "Radio JOVE - Solar & Planetary Radio Astronomy for Schools," <http://radiojove.gsfc.nasa.gov> (2007).
- [6] (Página 14) National Aeronautics and Space Administration, Gordon Space Flight Center, "Radio JOVE - Solar & Planetary Radio Astronomy for Schools," http://radiojove.gsfc.nasa.gov/office/kit_requests.htm (2007).
- [7] (Página 17) Radio-Sky Publishing - Resources for Amateur Radio Astronomers, Teachers, and Students, <http://www.radiosky.com> (2007).
- [8] (Página 18) L'Observatoire de Paris, Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique, Community of European Solar Radio Astronomers, <http://www.lesia.obspm.fr/cesra> (2007).
- [9] (Página 18) European Space Agency, "Solar and Heliospheric Observatory," <http://soho.esac.esa.int> (2007).
- [10] (Página 26) Interactive Data Language - IDL The Data Visualization & Analysis Platform, <http://www.itvis.com/idl/index.asp> (2007).

- [11] (Página 26) Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, "New Horizons," <http://pluto.jhuapl.edu> (2007).
- [12] (Página 30) National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, "Galileo Europa Mission," <http://www2.jpl.nasa.gov/galileo/gem/fact.html> (2007).
- [13] (Página 30) Kivelson M. G. et al., "Galileo Magnetometer Measurements: A Stronger Case for a Subsurface Ocean at Europa," *Science*, **289**, pp. 1340-1343 (2000).